



変更容易性を指向する医用超音波診断装置のシステムアーキテクチャに関する研究

著者	宇野 隆也
号	59
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5007号
URL	http://hdl.handle.net/10097/62727

氏 名	う の たか や 宇 野 隆 也
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 26 年 9 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	変更容易性を指向する医用超音波診断装置の システムアーキテクチャに関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 金井 浩
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 金井 浩 東北大学教授 川又 政征 東北大学教授 吉澤 誠 東北大学准教授 長谷川 英之

論 文 内 容 要 旨

医用超音波診断装置は、超音波探触子（プローブ）と呼ばれるセンサーデバイスから、生体に対して、1.5 MHz から 20 MHz 程度の周波数の超音波を照射し、その反射波（エコー）を利用して生体の断層像や血流情報などの診断情報をリアルタイムに映像化するシステムである。医用超音波診断装置は、CT（Computed Tomography）や MRI（Magnetic Resonance Imaging）などの画像診断装置と比較して、簡易な設備で、且つ、低侵襲に生体の診断情報を簡便にリアルタイムに取得することができるため、幅広い診断分野（腹部、循環器、血管、産科・婦人科、泌尿器科など）に適用されている。また、近年では、整形外科における治療や、プライマリ・ケア（総合診療）においても、有用性が指摘されている。企業や大学などの研究機関においては、それぞれの診断分野に特有の様々なニーズに対応するソリューションの開発が進められており、これらの研究開発を迅速に行うためには、自らのアイデアを簡単に試行できるシステムが望まれている。一方で、医用超音波診断装置のライフサイクルは 7~10 年であり、一般的な電子機器が短期間（数か月から 1 年）でモデルチェンジを繰り返す状況と比較すると、その期間は極めて長い。この長いライフサイクルの中で、医用超音波診断装置を取り巻く環境・状況は様々な変化していくため、この変化に柔軟に対応できる能力がシステムに求められている。しかしながら、従来の医用超音波診断装置のシステムアーキテクチャは、ハードウェアとソフトウェアが複雑に組み合わせられており、システムに対する変更を容易に行うことは極めて難しい。

本研究では、ハードウェアとソフトウェアが複雑に組み合わせられた組込みシステムである従来の医用超音波診断装置のシステムアーキテクチャを見直し、その変更容易性（Changeability）を高めるための手段を探索し、様々な変更要因に柔軟に対応できる医用超音波診断装置の新しいシステムアーキテクチャを提案した。また、そのシステムアーキテクチャに基づき、実際にプラットフォームを開発し、提案のシステムアーキテクチャの有効性を実証した。

本論文はこれらの成果をまとめたものであり、全編 8 章からなる。

第 1 章は、緒論であり、本研究の背景、目的及び本論文の構成を示している。

第 2 章では、本来、ソフトウェア工学の品質特性の一つである変更容易性の概念を、ハードウェアを含めたシステム

全体に拡張，変更容易性を実現する手段を提案している。

医用超音波診断装置は，特定用途向けでありながら，携帯情報端末のように汎用的な機能追加が要求される組込みシステムである。そこで，組込みシステムにおける変更容易性の獲得手段として注目されている，リコンフィギャラブル・コンピューティングの手法に着目する。

リコンフィギャラブル・コンピューティングは，メインとなる CPU (Central Processing Unit) とそれに従属するプログラマブル・デバイスを 1 つのシステムとしてとらえ，プログラマブル・デバイスを書き換える (リコンフィグ) することにより，システムの変更容易性を向上させる。リコンフィギャラブル・コンピューティングに利用するプログラマブル・デバイスとして，FPGA (Field Programmable Gate Array) やプロセッサ (DSP (Digital Signal Processor) や GPU (Graphic Processing Unit) など) を挙げることができる。

FPGA は，その原理上，配置配線情報を変更することにより，様々な回路を自由に実装することができる。一方で，そのスループットは，配置配線情報に基づく信号の伝搬時間によって左右される。したがって，機能追加に伴う，配置配線情報の変更によって，スループットに影響が出る可能性を排除できない。

プロセッサは，内部の演算ユニットがソフトウェアを逐次処理することにより，機能を実現するため，リアルタイム性を考慮しなければ，機能の追加・変更は容易である。一方で，プロセッサと外部環境とのインタフェースはそのプロセッサ毎に固有であるため外部との接続面での自由度が低い。さらに，演算パイプラインに直列に機能追加をする場合には，スループットへの影響を考慮する必要がある。

以上の知見から，医用超音波診断装置におけるリコンフィギャラブル・システムとしての最適解は，FPGA には医用超音波診断装置としての機能を担当させず，各ハードウェア間のインタフェースに役割を特化させる。プロセッサは，システムに対する機能の追加・変更にその役割を特化させる。このように，デバイスごとの役割を明確化し，適した配置を行うことにより，リコンフィギャラブル・コンピューティングの手法をより適切に適用することが可能となる。

第 3 章では，変更容易性を指向する医用超音波診断装置向けの新しいシステムアーキテクチャを提案し，それを適用したプラットフォームの詳細について示す。

医用超音波診断装置に，リコンフィギャラブル・コンピューティングのアーキテクチャを適用するに当たり，プロセッサの配置について検討した。医用超音波診断装置の処理系は，その処理におけるリアルタイム性能の要求に応じて，3 つのモジュールに分割することができる。1 つは，超音波送受信の繰り返し周波数 (PRF : Pulse Repetition Frequency) に依存する超音波ビーム処理部である。2 つ目は，モニタへの映像出力レートや音声再生レートに依存する画像・音声処理部である。3 つ目は，ユーザの操作に基づいて装置を制御する装置制御部である。タスクスケジューリングの複雑さを回避し，且つ，各モジュールにおける変更の影響を最小限にする目的で，それぞれのモジュールにプロセッサを配置し，プロセッサ間のインタフェースに FIFO (First In, First Out) 構造のバッファ領域を設けることとした。さらに，プロセッサそのもののハードウェアの変更の影響を最小限とするために，プロセッサとそのコンパニオン・デバイスを 1 つ

のハードウェアモジュールとすることとした。

以上の結果より、リコンフィギャラブル・コンピューティングを用いた新しい医用超音波診断装置のシステムアーキテクチャとして LPUS (Labile Platform for Ultrasound System) を提案する。LPUS は、装置制御部である CPU Module と、CPU Module のコプロセッサとして動作する Data Processing Module (DPM) と、外部環境とのインタフェースを担う Interface FPGA と、Interface FPGA を搭載し、CPU Module と DPM をコネクタによりインストール可能とする Carrier Board から構成される。CPU Module 上で動作するソフトウェアから、DPM と Interface FPGA をリコンフィグすることにより、システムの機能を容易に変更することが可能となる。

また、LPUS では、そのソフトウェア構造として Wrapper API (Application Programming Interface) を持ち、診断装置のソフトウェアからハードウェア構造を隠ぺいする。これにより、ハードウェアの変更の影響は、ソフトウェアにとって最小限とすることができる。以上の

ハードウェアとソフトウェアを実装し、医用超音波診断装置に実際に適用した (図 1)。

第 4 章では、ユーザの要求するシステム構成への変更の影響が、他の要素に影響しないことを示すため、医用超音波診断装置に装置のベンチマークテストを行う仕組みを追加した。具体的には、Interface FPGA にテストパタ

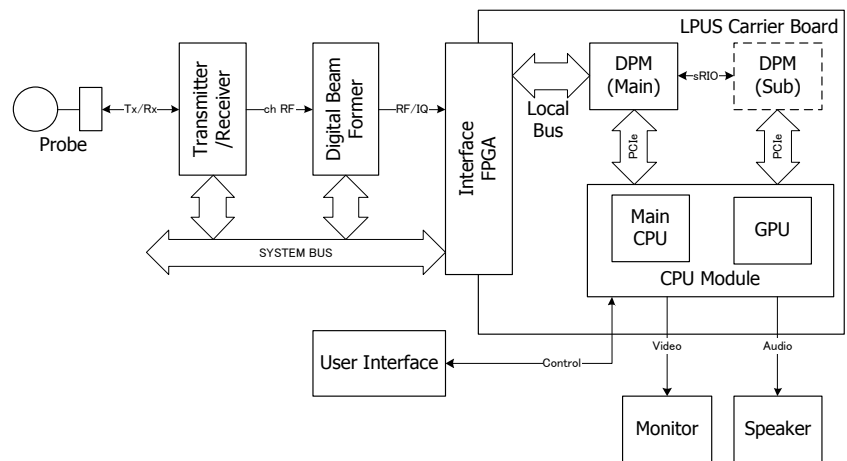


図 1 LPUS ハードウェアシステム構成

ンジェネレータを配置し、LPUS に対する信号入力をエミュレーションできるようにした。さらに、Wrapper API を介して、診断装置のソフトウェアとは別にゲストソフトウェアとして、テストパタンジェネレータを制御し、様々な条件でベンチマークを行うテストソフトウェアを配置した。診断装置のソフトウェアとビーム処理部のソフトウェアには影響を及ぼさず、試験系の導入ができることを示した。また、ベンチマーク結果に基づき、システムの性能改善を試行し、ビーム処理部のソフトウェアと、Interface FPGA からのデータインタフェースの修正を行った。この場合においても、変更部分以外に影響を及ぼすことなく、テストを試行できる。このように LPUS では、変更の影響範囲が限局的であり、変更の影響が他に及ばないことを示した。

第 5 章では、ソフトウェア・パイプラインへの機能追加の方法を示すために、穿刺針強調表示機能を新規に追加した。穿刺針強調表示機能は、生体内に挿入された強反射体である穿刺針を強調表示する機能であり、送信ビーム角度の調整、フレーム単位での送信ビーム角度の振り分け (通常診断像用、強調表示用)、強反射体の抽出 (空間フィルタ)、フレーム合成からなる。一方で、医用超音波診断装置には、類似の機能として空間コンパウンド機能がある。空間コンパウン

ド機能は、複数方向にフレーム毎に、超音波照射角度を切り替えながら送受信を行い、それらのフレームの移動平均をとり、アーチファクトを低減する機能である。それぞれの機能は類似していることから、空間コンパウンド機能を修正し、これに並行する形で、排他に関数を追加した。空間コンパウンド機能の実行時間が 2.89 msec であったのに対して、穿刺針強調表示機能の実行時間は、1.37 msec であった。

このように、LPUS では、追加しようとする機能に類似した機能（関数）が既に判明しており、その関数を参考にすることができるのであれば、機能を並列に追加するアプローチにより、システムに容易に機能を追加することが可能である。しかしながら、参考となる機能がない場合や、既存の機能に処理を直列に追加したい場合、あるいは、知的財産権の問題を含めて、完全に独自のアルゴリズムを実装したい場合には、本章のアプローチだけでは不完全である。

第 6 章では、医用超音波診断装置の既存の処理系と独立した形でユーザ独自の機能追加が可能であることを示すために、サブプロセッサモジュールへの 2 次元補間演算機能の組込みを行った。今回開発した LPUS では、サブプロセッサモジュールとして DPM をもう 1 枚追加できる構造となっている（図 1）。このサブプロセッサモジュールは、ビーム処理部のプロセッサから、RF データやピクセルデータを DMA 転送で受け取ることができる。サブプロセッサモジュールには、2 次元補間演算ソフトウェアを、CPU Module では、診断装置のソフトウェアとは別に処理結果を受領するソフトウェアを配置し、既存の処理系とは独立したソフトウェアの実装が可能であることを示した。また、サブプロセッサモジュールでは、ハードウェアとのデータの授受やドライバなどは既に組み込まれており、2 次元補間演算のようなデータ演算を 32 種類組み換え可能な構造となっており、より簡単に機能の実装が可能である。

第 7 章は、考察である。第 4～6 章の実証に基づき、LPUS では、変更による影響が限定的となるようにアーキテクチャが設計されており、変更容易性を構成する 4 特性のうち、保守性、拡張性、再構築性に、LPUS のアーキテクチャが優れていることを示した。一方で、移植性については、プラットフォーム依存性が高く課題が残されていることを示した。さらに、今後の展開として、マルチデバイス間の検証の問題を挙げ、Open CL™などのヘテロジニアス・コンピューティングの手法の導入により、システム全体の開発がより柔軟に行える可能性があることを指摘した。一方、今回開発した LPUS には Digital Beam Former が含まれていないが、これは、A/D 変換後の大容量データを既存のプロセッサのメモリに取り込むことが不可能であるためである。LPUS では、Interface FPGA の外部に Digital Beam Former を FPGA として配置することで、ある程度のカスタマイズができる可能性があることを示唆した。

第 8 章は結論である。

以上より、本研究では、変更容易性を指向する医用超音波診断装置の新しいシステムアーキテクチャとして、リコンフィギュラブル・コンピューティングの手法を用いたアーキテクチャを提案した。さらに、それを実現するプラットフォームとして、LPUS を開発した。また、LPUS を実際に適用し、そのアーキテクチャの有効性について実証することができた。

論文審査結果の要旨

医用超音波診断装置は、低侵襲でありながら簡便に生体の診断情報をリアルタイムに得ることができる画像診断手段として幅広い診断分野で使用されており、その適用範囲も拡大している。企業や大学などの研究機関は診断分野特有のニーズに沿った開発を行っているが、そのシステムアーキテクチャは極めて複雑であり、迅速な開発を阻んでいる。著者は、医用超音波診断装置のシステムアーキテクチャに変更容易性の概念を導入し、リアルタイム性能を落とすことなく、研究者らによるシステムの変更を可能とするシステムアーキテクチャを提案・開発し、その有効性を実証した。本論文は、これらの成果をまとめたものであり、全編 8 章からなる。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景、目的及び本論文の構成を述べている。

第 2 章では、ソフトウェア工学の概念である変更容易性の概念を、ハードウェアを含めたシステム全体に拡張し、変更容易性を実現する手段を提案している。システムの変更容易性の実現手段として、リコンフィギャブル・コンピューティングに着目し、それらを構成するプログラマブル・デバイスとして FPGA (field-programmable gate array) とプロセッサに注目し、FPGA を外部とのインタフェースの役割、プロセッサを機能・性能の変更の役割にそれぞれ特化させたアーキテクチャが、医用超音波診断装置にとって最適な構成であることを示している。

第 3 章では、変更容易性を指向する医用超音波診断装置向けの新しいシステムアーキテクチャとプラットフォームを提案している。医用超音波診断装置を、リアルタイム要求に基づく 3 つの領域に分割してそれぞれにプロセッサを配置し、このアーキテクチャに基づくプラットフォームを実際に設計・開発することにより医用超音波診断装置を実現している。これらは実用上、優れた成果である。

第 4 章では、ユーザが所望するシステム構成への変更が、他の要素に影響しないことを示すため、実際の医用超音波診断装置を用いてベンチマークテストを行っている。ベンチマーク環境は、診断装置のソフトウェアやビーム処理部を変更せずに組み込むことができ、さらに性能改善の試行のための処理の変更は、ベンチマーク環境を変更せずに可能であることを示した。これは、本アーキテクチャの高い保守性を実証したものである。

第 5 章では、ソフトウェア・パイプラインへの機能追加の方法を示すため、穿刺針強調表示機能をシステムに組み込んでいる。使用しているプロセッサに対し、処理を並列に追加することにより、全体のスループットに影響を及ぼさずに機能の追加が可能であることを示した。これは実用上の有効性を示した成果である。

第 6 章では、超音波診断装置の処理系と独立した形で独自の機能の追加ができることを示すため、サブプロセッサモジュールによって 2 次元補間演算機能を組み込み、本アーキテクチャの高い拡張性を実証している。

第 7 章は、考察である。第 4～6 章の適用事例に基づく、本システムアーキテクチャの変更容易性に関する有効性を示すとともに、ディジタルビームフォーマーなど他の適用における課題とそれに対する圧縮処理の挿入の解決策についても示している。

第 8 章は、結論である。

以上要するに本論文は、医用超音波診断装置の変更容易性を高めるシステムアーキテクチャを提案するとともに、そのプラットフォームを開発し、適用事例を通して有効性を実証したもので、医用超音波工学および電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。